한국소음진동공학회 2013년 추계학술대회논문집, pp. 279~280

접수된 유한 평판의 분산선도 예측을 위한 유체연성 효과에 대한 연구

Study on fluid coupling effect for prediction of dispersion curve on a finite plate in water

정병규* · 유정수† · 홍진숙** · 정의봉*** · 신구균****

Byung-kyoo Jung, Jungsoo Ryue, Chin-suk Hong and Weui-bong Jeong, Ku-kyun Shin

1. 서 론

유한한 평판에 존재하는 파동은 유한요소법(finite element method)을 통해 얻은 공간상의 응답으로부터 공간에 대한 푸리에 변환(fourier transform)을 통해 파수영역(wavenumber domain)의 응답을 구함으로써 예측할 수 있다. 이러한 파수영역 응답의 peak을 주파수와의 관계에 따라 그리게 되면 구조물에 존재하는 파동을 나타내는 분산선도(dispersion curve)를 얻을 수 있다.

접수된 유한 평판에 존재하는 파동의 경우에도 동일한 방법으로 분산선도를 예측할 수 있으나 유한요소법과 경계요소법(boundary element method)을 연성하는 과정이 필요하다. 그러나 경계요소법의 경우 구성하는 행렬이 주파수에 관한 함수로 정의되기 때문에 매 주파수마다 구조와 유체행렬을 연성하여 풀어야한다. 또한 정확한 연성결과를 얻기 위해서는 경계요소의 수가 진동을 표현할 구조요소의 수만큼 많아야 하는데, 이는 구조의 설계나 파동 분석의 입장에서 상당한 시간적 비용으로 작용한다.

이에 본 논문에서는 유한 평판에 연성되는 유체행렬이 분산선도에 어떤 영향을 미치는지 파악하고 파동 분석의 입장에서 대안을 제시하고자 한다.

2. 수치모델 및 구조 · 유체 연성이론

† 교신저자 ; 울산대학교 조선해양공학부
E-mail : jsryue@ulsan.ac.kr
Tel : (052)259-2162, Fax : (052)259-2677
* 부산대학교 대학원 기계공학부
** 울산과학대학교 기계공학부
*** 부산대학교 기계공학부
**** 국방과학연구소(ADD)

2.1 수치해석 모델

접수된 유한 평판의 분산선도 예측을 위하여 양단이 단순 지지된 단면 $0.5m\times 3t$, 길이 $12m$의 평판을 모델링하였으며 재질은 강철(Steel)로 설정하였다. 음향요소의 경우 경계요소법 중 하나인 direct BEM을 사용하기 위해 동일 크기의 상자형태로 모델링하였으며 외부 유체는 물로 설정하였다.

2.2 평판의 구조 · 유체 연성 이론

유체력이 고려되고 감쇠가 없는 유한요소평판에 대한 지배방정식은 아래의 식(1)과 같다.

$$\left([K_s]-\omega^2[M_s]\right)\{u\}+[L_c]\{p\}=\{F_s\} \qquad (1)$$

여기서 $[M_s]$, $[K_s]$는 구조물의 질량, 강성행렬을 나타내며 ω는 주파수, $\{u\}$는 평판의 변위벡터, $\{F_s\}$는 구조물의 외력벡터를 의미한다. 위 식에서 유체력은 표면의 음압 $\{p\}$와 연성행렬 $[L_c]$의 곱으로 표현되는데, 이때 $\{p\}$는 식(2)의 음향 경계요소 방정식을 통해 변위로 표현가능하다.

$$[A(\omega)]\{p\}=j\omega[B(\omega)][T]\{u\} \qquad (2)$$

위 식에서 $[A(\omega)]$, $[B(\omega)]$는 구조물의 표면 속도와 음압의 관계를 정의하는 행렬이며 $[T]$는 구조물의 변위를 평판의 법선방향 변위로 변환하는 행렬이다. 이때 $[A(\omega)]$ 행렬은 평판일 경우, 단위행렬 $[I]$로 정의된다.

식(2)의 관계로부터 구조물의 지배방정식인 식(1)을 정리하면 아래의 식(3)과 같이 정리되며, 이 식을 통하여 연성된 구조물의 응답을 구할 수 있다.

$$\left([K_s]-\omega^2\left([M_s]+\frac{[L_c][B(\omega)][T]}{j\omega}\right)\right)\{u\}=\{F_s\} \quad (3)$$

3. 유체연성 효과의 분석 및 검증

3.1 음향 경계요소이론식을 통한 접근

Direct BEM을 사용하는 음향 경계요소법의 지배 방정식은 3차원 구조물의 평판일 경우 아래의 식(4)와 같이 간략화 될 수 있다.

$$\begin{aligned} p &= \int_S 2j\omega\rho(j\omega u_n)\frac{e^{-jkr}}{4\pi r}dS \\ &= \int_S \frac{(j\omega)^2\rho u_n}{2\pi r}(\cos(kr)-j sin(kr))dS \end{aligned} \quad (4)$$

위 식에서 k는 파수(wavenumber), ρ는 유체의 밀도, r은 거리, u_n은 법선방향 변위를 의미한다. 여기서 식(4)를 식(1)에 대입하면 이론적인 연성방정식을 구할 수 있고, 이때 유체의 질량 행렬 $[M_f]$은 식(5)과 같은 형태로 구성된다.

$$\begin{aligned} [M_f] &= [L_c]\left[\int_S \rho\frac{\cos(kr)}{2\pi r}NdS\right][T] \\ &+ j[L_c]\left[\int_S \rho\frac{\sin(kr)}{2\pi r}NdS\right][T] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 N은 변위 u를 정의하는 형상함수이다. 위 식을 살펴보면 유체의 질량 행렬은 실수부와 허수부로 나뉘는데, 실수부는 유체의 부가질량이며, 허수부는 유체에 의한 감쇠를 의미한다. 위 식에서 거리 r이 0에 가까워지는 대각요소의 경우 식(5)는 아래의 식(6)과 같이 단순화 될 수 있다.

$$M_{f_{ii}} = [L_c]\left[\int_S \frac{\rho}{2\pi}\left(\frac{1}{r}-j\frac{\omega}{c}\right)dS\right][T] \quad (6)$$

위 식은 파수와 주파수, 음속의 관계 $k=\omega/c$를 이용하여 표현한 것으로, 부가질량인 실수부는 주파수에 독립적이며 감쇠 영향인 허수부의 경우 주파수에 비례함을 알 수 있다. 또한 ωr이 음속 c보다 작은 주파수에서는 주변 유체의 부가질량에 의한 영향이 커서 이 구간에서는 부가질량만을 고려하더라도 평판의 분산선도가 비교적 정확하게 나타날 것임을 예상할 수 있다.

3.2 분산선도의 예측 및 검증

2.2절에서 얻은 구조유체 연성 방정식을 이용하여 유체행렬이 매 주파수 마다 바뀌는 경우에 대한 진동해석과 유체의 부가질량만을 고려한 진동해석을 수행하였다. 그리고 얻어진 공간 응답으로부터 푸리에 변환을 수행하여 평판의 분산선도를 예측해보고 이를 아래의 Fig.1에 비교해보았다.

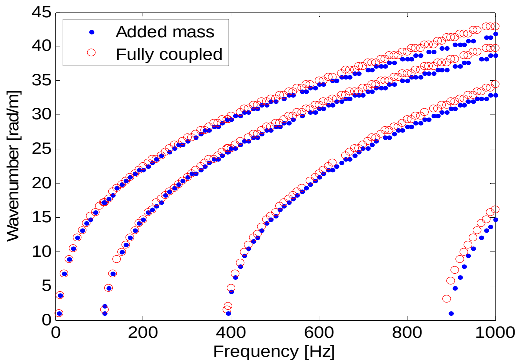

Fig1. Comparison of dispersion curve

위 결과를 살펴보면 약 700Hz 이상에서 상대적 오차가 심화되긴 하나, 전반적으로 부가질량만을 고려한 결과가 전체 연성결과를 잘 나타내고 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 접수된 유한 평판의 분산선도 예측에서 유체행렬이 미치는 영향을 경계요소의 방정식을 이용하여 추정해보았다. 연성되는 유체행렬은 구조의 입장에서 부가질량 또는 감쇠로 작용하는데, 평판의 파동분석을 위한 분산선도 추정의 입장에서는 유체의 부가질량만을 고려하더라도 전반적인 결과가 잘 나타남을 살펴볼 수 있었다.